

УДК 620.186.12

**Ю. Ю. Эмурлаева**

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

emurlaeva@corp.nstu.ru

## ДИФфуЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ГРАНИЦЕ СВАРЕННЫХ ВЗРЫВОМ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ

Представлены результаты исследований слоистых композитов  $\text{Al}-\text{Al}_3\text{Ti}-\text{Ti}$  и  $\text{Al}-\text{Al}_3\text{Zr}-\text{Zr}$ . Образцы были изготовлены сваркой взрывом с последующим отжигом в вакуумной печи при 570, 590, 610 и 630 °С. Для изучения поэтапного роста интерметаллического слоя время варьировалось от 1 до 100 ч. Структура исследована при помощи методов электронной микроскопии.

*Ключевые слова:* сварка взрывом, интерметаллиды, фазовые превращения, многослойный композит

**Yu. Yu. Emurlaeva**

## DIFFUSION PROCESSES AT THE INTERFACE OF EXPLOSIVE WELDED LAMINATE COMPOSITES

The results of studies regarding the  $\text{Al}-\text{Al}_3\text{Ti}-\text{Ti}$  and  $\text{Al}-\text{Al}_3\text{Zr}-\text{Zr}$  composites are presented. Samples were fabricated by explosion welding with annealing in a vacuum furnace at 570, 590, 610, and 630 °C. The time ranged from 1 to 100 hours to study the phased growth of the intermetallic layer. The structure was investigated using electron microscopy.

*Key words:* explosive welding, intermetallics, phase transformation, metallic–intermetallic laminate composites

**С**варка взрывом — это высокоскоростная сварка с применением давления, основанная на использовании энергии взрыва. Привариваемая (метаемая) деталь устанавливается под углом к неподвижной детали (мишени). При соударении деталей в точке контакта образуется кумулятивная струя, очищающая поверхность сплавляемых пластин от загрязнений и оксидных пленок, происходит совместная пластиче-

ская деформация обеих деталей, и они свариваются. Одним из преимуществ сварки взрывом является возможность соединения металлов с различными физическими свойствами, а также больших площадей.

$\text{Al}_3\text{Ti}$  и  $\text{Al}_3\text{Zr}$  обладают уникальным набором механических свойств [1; 2]. Основным преимуществом интерметаллидов является их высокая хрупкость, поэтому для промышленного применения триалюминиды используются в качестве армирующего компонента в композиционных материалах.

Для изучения процесса зарождения и роста фаз на границе  $\text{Al}-\text{Ti}$  и  $\text{Al}-\text{Zr}$  были изготовлены образцы слоистых композитов методом сварки взрывом с последующей термической обработкой. Образцы отжигали в вакуумной печи при температурах 570, 590, 610 и 630 °C с временем выдержки 1, 5, 25 и 100 ч.

На рис. 1, *а, б* приведены изображения композита после сварки, полученные методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) в режиме вторичных электронов. Яркие и темные области на изображении представляют собой листы  $\text{Ti}$  и  $\text{Al}$ .

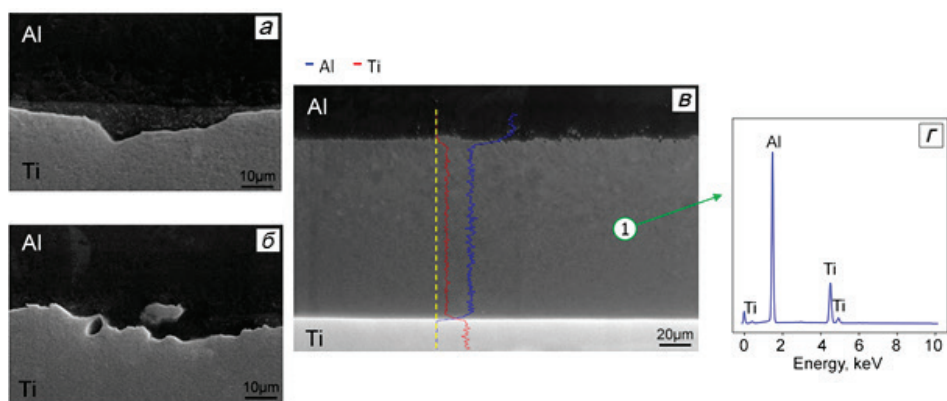


Рис. 1. Граница соединения листов алюминия и титана:

*а, б* — после сварки, *в* — после отжига при 630 °C и 100 ч;  
*г* — энергодисперсионный спектр интерметаллидного слоя

Граница имеет волнистую морфологию и состоит из мелких зерен светлого контраста в темной матрице, как видно из снимка (рис. 1, *а*). Во время процесса сварки взрывом на границе возможно образование таких соединений как  $\text{Ti}_3\text{Al}$ ,  $\text{TiAl}$  и  $\text{TiAl}_3$ , а также метастабильной фазы  $\text{TiAl}_2$ .

Также представлен образец после отжига при температуре 630 °С и выдержке 100 ч (рис. 1, в). Вследствие взаимной диффузии атомов Ti и Al образовался интерметаллидный слой. Посредством энергдисперсионного анализа (ЭДС) было установлено, что состав фазы составляет около 25 ат. % Ti и 75 ат. % Al, что подтверждает образование соединения  $TiAl_3$ . На рис. 1, г показан типичный спектр ЭДС. Линейное сканирование поперек интерметаллического слоя свидетельствует, что в диффузионном слое нет градиента концентрации Ti и Al. Также из рис. 1, в видно, что граница Ti/ $TiAl_3$  более гладкая, чем граница с Al.

Граница Zr/Al после сварки также имеет волнистую морфологию и состоит из мелких зерен, хрупких кристаллических, нанозернистых, аморфных фаз (рис. 2, а). Фазовая диаграмма Zr–Al указывает на присутствие  $Zr_3Al$ ,  $Zr_2Al$ ,  $Zr_3Al_2$ ,  $Zr_4Al_3$ ,  $ZrAl$ ,  $Zr_2Al_3$ ,  $ZrAl_2$  и  $ZrAl_3$ .

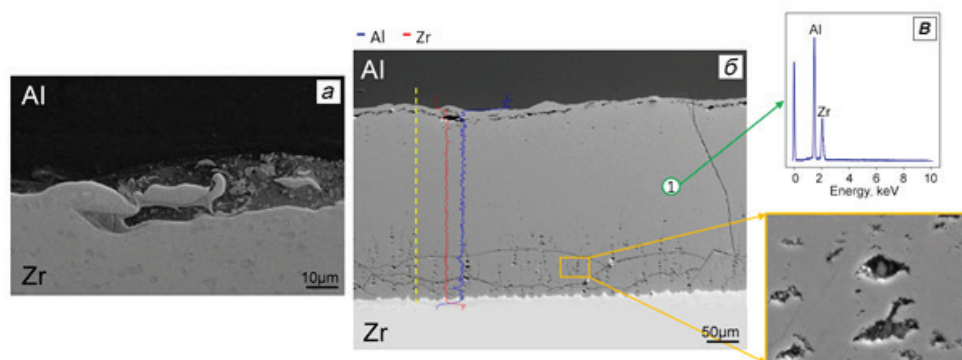


Рис. 2. Граница соединения листов алюминия и циркония:

а — после сварки, б — после отжига при 630 °С и 100 ч,  
в — энергодисперсионный спектр интерметаллидного слоя

Изображение, полученное отражением вторичных электронов, показывает образование сплошного диффузионного слоя между Al и Zr (рис. 2, б). Профиль концентрации элементов, взятый поперек зоны диффузии, показал равномерное распределение Al и Zr в пропорциях, соответствующих соединению  $ZrAl_3$ .

Также оптический анализ выявил образование пористости и пустот около границ с цирконием и алюминием. Слабая связь на границе  $ZrAl_3$ /Al и образование пор на границе  $ZrAl_3$ /Zr может быть вызвана большой разницей в термическом коэффициенте расширения

между Al и Zr и/или выраженным эффектом Киркендалла, возникающим из-за значительной разницы в коэффициентах диффузии Al и Zr.

#### Литература

1. Structural and mechanical properties of metallic-intermetallic laminate composites produced by explosive welding and annealing / I. A. Bataev [et al.] // Materials and Design. 2012. № 35. P. 225–234.

2. Laik A., Bhanumurthy K., Kale G. B. Intermetallics in the Zr–Al diffusion zone // Intermetallics. 2004. № 12. P. 69–74.